

Desenvolvimento de modelo agrometeorológico espectral para estimativa de rendimento do milho na Província de Manica-Moçambique¹

Hugo Adriano Mabilana², Denise Cybis Fontana³, Eliana Lima da Fonseca⁴

RESUMO

Moçambique é um país localizado ao longo da costa Leste da África Austral, com a economia baseada essencialmente na agricultura. A cultura do milho (*Zea mays* L.) é a mais importante, cultivada em regime de sequeiro, com rendimentos dependentes das condições meteorológicas. Este trabalho teve como objetivo o ajuste de um modelo agrometeorológico espectral, para estimativa de rendimentos do milho, na província de Manica. A área de estudo envolveu os distritos de Gondola, Manica, Mossurize e Sussundenga, responsáveis por mais de 80% da produção de milho na província de Manica, nos anos de 2000 a 2009. ETr e ETm e ISNA foram as variáveis agrometeorológicas testadas no ajuste, obtidas a partir de estimativas de elementos meteorológicos do modelo do ECMWF. As variáveis espectrais foram os índices EVI e NDVI, provenientes do produto MOD13Q1, e o índice LSWI, calculado utilizando-se as bandas de refletância contidas neste produto. O modelo agrometeorológico espectral, ajustado por meio de regressão linear múltipla, teve como variáveis independentes os índices meteorológicos e espectrais e, como variável dependente, o rendimento médio ou o rendimento relativo. O modelo regional, que incluiu os distritos de Gondola, Manica e Sussundenga, e considerou o rendimento relativo, foi o mais recomendado para estimativa de rendimentos do milho, na região, com $r^2 = 0,762$ e RMSE de 9,46%.

Palavras-chave: MODIS, regressão linear múltipla, NDVI, EVI, LSWI.

ABSTRACT

Development of an agrometeorological spectral model to estimate maize yields in the Manica Province-Mozambique

Mozambique is located along the east coast of southern Africa, with economy primarily based on agriculture. Maize (*Zea mays* L.) is the most important crop, cultivated without irrigation, with yields dependent mostly on weather conditions. The objective of the study was to develop a spectral-agrometeorological model for maize yields forecast, in Manica province. The study area involved the districts of Gondola, Manica, Mossurize and Sussundenga, responsible for more than 80% of corn production in Manica province from 2000 to 2009. The meteorological variables ETr / ETm and ISNA were used in the model, after being generated from meteorological data in the ECMWF model. The spectral variables were EVI and NDVI, from product MOD13Q1, and LSWI was calculated from combinations of infrared and shortwave reflectance bands. The spectral agrometeorological model, adjusted by multiple linear regressions, had spectral and meteorological indices as independent variables, and maize yield (average and relative) as dependent variable. As results, the regional model which used yields from the districts of Gondola, Manica and Sussundenga, and the relative yield, was the most suitable for maize yields forecast in the region, with $r^2 = 0.762$ and RMSE of 9.46%.

Key words: MODIS, multiple linear regressions, NDVI, EVI, LSWI.

Recebido para publicação em 20/04/2011 e aprovado em 09/04/2012

¹ Extraído da dissertação de mestrado do primeiro autor, bolsista do CNPq no âmbito do PEC-PG.

² Engenheiro-Agrônomo, Mestre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Caixa Postal 15044, 91501-970, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. hmabilana@yahoo.com.br (autor para correspondência).

³ Engenheira-Agrônoma, Doutora. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 7712, Caixa Postal 15000, 91501-970, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. dfontana@ufrgs.br

⁴ Engenheira-Agrônoma, Doutora. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Caixa Postal 15.001, 91501-970, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. eliana.fonseca@ufrgs.br

INTRODUÇÃO

Moçambique, localizado a leste da África austral, é um país cuja principal atividade econômica é a agricultura, onde, de acordo com MICOA (2002), absorve mais de 80% da população laboral. Esta atividade é dominada pelo setor familiar, com mais de 95% das áreas cultivadas, em que o destino da produção é essencialmente a subsistência e somente os excedentes são comercializados. O milho, produzido em condições não irrigadas, é a principal cultura alimentar em Moçambique. De acordo com dados do Censo Agropecuário de 2000, as culturas do milho e da mandioca totalizam 50% do valor de produção agrícola. Os produtores do setor familiar alocam entre 20 e 60% das suas áreas agrícolas para produzir o milho, em todo o país (MICOA, 2002), sendo, portanto, reconhecida sua contribuição para a segurança alimentar da população Moçambicana.

Como a maioria das culturas não irrigadas, o rendimento das culturas de milho é influenciado, principalmente, pelas condições meteorológicas, que, assim, afetam o abastecimento deste cereal. Mecanismos de monitoramento das culturas alimentares e de previsão de rendimentos podem auxiliar a minimizar os efeitos negativos de eventos extremos, que resultem em déficits alimentares decorrentes de condições meteorológicas adversas às culturas agrícolas.

Modelos agrometeorológicos de estimativas de rendimento de grãos constituem importantes ferramentas em análises de segurança alimentar, dada a economia de tempo e de recursos para o planejamento e tomada de decisão. Estimativas precisas de rendimento de grãos das culturas não irrigadas podem servir de fonte objetiva para as estatísticas agrícolas e, quando conjugadas com dados de área cultivada, podem fornecer informações sobre a produção esperada para uma dada região. As estimativas de produção servem como indicador da disponibilidade de alimentos e auxiliam os tomadores de decisão em medidas relativas à segurança alimentar das populações. Pode-se, portanto, mediante estas informações, quantificar as necessidades de alimentos, em situações de déficit alimentar resultante de baixa produção. Por outro lado, a mesma quantificação torna-se útil em caso de excedente de produção, fornecendo dados de disponibilidade de alimentos para comercialização agrícola.

O modelo do balanço hídrico da cultura gera a estimativa de rendimento de grãos, assumindo o déficit hídrico da cultura como fator limitante. Para culturas desenvolvidas em condições não irrigadas, este déficit constitui seguramente o principal fator condicionante do rendimento de grãos, apesar de não ser o único. Diferenças no manejo e fertilidade dos solos, incidência de pragas e doenças, entre outros, podem influenciar o rendimento de grãos

das culturas sob condições meteorológicas semelhantes. Estes fatores, portanto, não são levados em consideração em modelos agrometeorológicos.

A disponibilidade de produtos de sensoriamento remoto, como os índices de vegetação, com caráter operacional e disponibilizado em tempo “quase real”, possibilita o monitoramento de culturas agrícolas e a sua implementação em modelos de estimativa de rendimento de grãos. Índices de vegetação são medidas empíricas e robustas da atividade da superfície terrestre, concebidas para realçar a vegetação, por meio da combinação de duas bandas espectrais, especialmente vermelho e infravermelho próximo (Huete *et al.*, 1999). A adição de componente espectral nos modelos de previsão de rendimento das culturas pode melhorar o seu desempenho e permitir sua operação numa escala regional. King (1989) afirmou que os dados espectrais adicionam uma acurácia extra aos modelos de estimativa de rendimento de grãos de culturas.

O sensoriamento remoto, para países como Moçambique, tem sido apontado como uma ferramenta com grande potencial, podendo aumentar a rapidez e melhorar a cobertura espacial das informações (Rojas & Amade, 1998). No caso específico da agricultura, a introdução de técnicas de sensoriamento remoto reduz o tempo de processamento da informação sobre a situação das culturas agrícolas no campo e constitui uma fonte menos onerosa de obtenção de informações.

A hipótese que se apresenta é de que a combinação de variáveis agrometeorológicas com os dados provenientes de sensores orbitais, por meio de modelos agrometeorológicos-espectrais, melhore a representação espacial das estimativas de rendimento de grãos de milho em Moçambique. Nestes modelos, a componente agrometeorológica introduz informações como radiação solar, umidade relativa do ar, temperatura e disponibilidade de água no solo, enquanto a componente espectral introduz informações relativas ao monitoramento, variedades e fatores de estresse não considerados em modelos agrometeorológicos (Rudorff & Batista, 1990).

Modelos que integram as componentes espectrais para além das agrometeorológicas têm sido propostos para variadas culturas. No Estado Rio Grande do Sul, ao modelo agrometeorológico espectral, ajustado por Fontana & Berlatto (1998), para estimar rendimento de grãos da soja, foi aplicado o *Global Vegetation Index* (GVI) no termo espectral. Melo *et al.* (2008) apresentaram, também para a cultura da soja, o modelo modificado de Jensen na componente agrometeorológica e o termo espectral foi constituído por imagens NDVI do sensor AVHRR/NOAA. Rizzi & Rudorff (2005) utilizaram imagens de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI- *Normalized Difference Vegetation Index*), geradas pelo sensor MODIS

(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer), para calcular o índice de área foliar utilizado no modelo agrometeorológico de estimativa de rendimento de grãos da soja, no Rio Grande do Sul. Klering (2007) parametrizou o modelo agrometeorológico espectral para o arroz irrigado, com o uso de imagens de NDVI e EVI (*Enhanced Vegetation Index*), do sensor MODIS, na componente espectral. Rojas (2007) apresentou a experiência africana nestas aplicações, desenvolvendo um modelo agrometeorológico espectral para estimativa de rendimentos do Milho no Quênia.

Este trabalho objetivou ajustar um modelo de estimativa de rendimento de grãos para a cultura do milho na província de Manica, em Moçambique, combinando variáveis agrometeorológicas e espectrais.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo compreendeu quatro distritos da Província central de Manica: Gondola, Manica, Mossurize e Sussundenga (Figura 1), localizados entre as latitudes 18° 22' 26,4" e 20° 39' 28,8" Sul e longitudes 32° 29' 6" e 34° 2' 2,4" Leste, com uma superfície total de 22.423 km², e uma população total de 810.000 habitantes.

Cada um dos distritos possui produção anual de milho superior a 20.000 toneladas (média no período de 2000 a 2009). Os mesmos distritos, de acordo com as estatísticas oficiais, foram responsáveis, em média, por mais de 80% da produção de milho da província de Manica, no período de análise.

A área de estudo encontra-se sobre duas regiões agroecológicas (região central de média altitude e de alta altitude), com características edafoclimáticas potenciais para produção de milho. De acordo com o Walker *et al.* (2006), estas regiões agroecológicas são as mais dinâmicas do País em termos de produção de milho e, por isso, com destaque na procura de novas variedades, no contexto do programa do milho do Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM).

O clima predominante é o tropical de savana (classificação de Köppen - Aw), caracterizado por apresentar duas estações climáticas distintas, em termos de disponibilidade hídrica: uma estação quente e chuvosa e outra fresca e seca, que se encontram, respectivamente, nos períodos de outubro a março e abril a setembro.

Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos compreendem as estimativas de precipitação pluvial e evapotranspiração de referência (Penmann-Monteith) do Centro Europeu de Previsão do Tempo em Médio Prazo (ECMWF-European Centre for Medium-range Weather Forecast) no período

de 2000 a 2009. Os dados são fornecidos numa base decenal, em formato *shapefile*, composto por pontos com distâncias constantes de 0,25° de latitude e longitude. As estimativas de elementos meteorológicos estão disponíveis para *download* gratuito no *website* da MARS unit (<http://mars.jrc.ec.europa.eu/mars/About-us/FOODSEC/Data-Distribution>).

Os dados de estimativas de elementos meteorológicos foram interpolados pelo método de inverso do Quadrado da Distância (IQD) e recortados sobre a área de estudo, por meio do *software* ARCGIS 9.3, sendo depois extraídos os valores médios, por distrito, na área de estudo.

Os vetores da divisão político administrativa de Moçambique, gerados pelo Centro Nacional de Cartografia e Teledetecção de Moçambique (CENACARTA), estão disponíveis, gratuitamente, no *website* www.cenacarta.com.

Imagens MODIS

A área de estudo está compreendida entre dois tiles dos produtos MODIS, h21v10 e h21v11. Foi efetuado um mosaico, utilizando-se o *software* ENVI 4.5, seguido de um recorte da área de estudo. Foi feita a extração dos valores médios dos índices espectrais para cada distrito em todas as composições de 16 dias.

Os dados espectrais testados para o ajuste do modelo foram: o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Vegetação Realçado (EVI) e o Índice de Umidade da Superfície Terrestre (LSWI- *Land Surface Water Index*). O NDVI e o EVI foram obtidos a partir do produto MOD13Q1 do sensor MODIS, que consiste em composições de 16 dias de índice de vegetação, com 250 metros de resolução espacial.

O NDVI, proposto por Rouse *et al.* (1974), é calculado a partir da diferença entre as reflectâncias de superfície do infravermelho próximo (ρ_{NIP}) e do vermelho (ρ_V), normalizada pela sua soma, dado por:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIP} - \rho_V}{\rho_{NIP} + \rho_V} \quad (1)$$

O EVI é, de certa forma, um NDVI modificado, com fatores de ajustes da influência do solo (L) na resposta dos alvos, e os coeficientes (C_1 e C_2), que descrevem a correção quanto ao espalhamento atmosférico da banda vermelha pela azul (ρ_{AZUL}) (Jensen, 2009), sendo calculado por:

$$EVI = G \frac{\rho_{NIP} - \rho_V}{\rho_{NIP} + C_1 \rho_V + C_2 \rho_{AZUL} + L} (1 + L) \quad (2)$$

Para sensor MODIS, os coeficientes G , L , C_1 e C_2 adotados no algoritmo, são respectivamente: 2,5, 1, 6 e 7,5.

Além do EVI e NDVI, o produto MOD13 contém também quatro bandas de fator de refletância de superfície, correspondentes, respectivamente, à região do azul (0,459-0,479μm), vermelho (0,62-0,67μm), infravermelho próximo

(0,841-0,876 μ m) e infravermelho médio (2,105-2,155 μ m). As bandas do infravermelho próximo e médio foram usadas para o cálculo do LSWI, a partir da expressão:

$$LSWI_{2,1} = \frac{\rho_{NP} - \rho_{IM}}{\rho_{NP} + \rho_{IM}} \quad (3)$$

Dados de Rendimento de milho

Os dados de rendimento de grãos do milho, produzido no setor familiar, por distrito, foram fornecidos pelo Ministério da Agricultura de Moçambique, por meio do Sistema Nacional de Aviso Prévio, e incluem, além do rendimento médio de grãos do milho, a produção anual por distrito.

Dados de rendimento de grãos, produção e área cultivada das principais culturas agrícolas são gerados com base em inquéritos agrícolas, efetuados em agregados familiares identificados por amostragem probabilística em cada um dos distritos. De acordo com a metodologia descrita pela Direcção Nacional de Serviços Agrários do Ministério da Agricultura de Moçambique (DNSA/MINAG), os dados são então extrapolados para o distrito, utilizando-se uma combinação com os dados do Censo de População e Habitação, de onde são retiradas variáveis como:

tamanho médio da família, percentual da população economicamente ativa, padrão de distribuição de culturas agrícolas, dentre outros.

A tendência tecnológica dos rendimentos médios do milho, por distrito, ao longo do tempo, foi removida por meio de uma regressão linear simples (equação 4) e corrigida por meio da equação 5.

$$Y_i = a + bx_i \quad (4)$$

$$Y_{ci} = Y_i - bx_i \quad (5)$$

em que Y_i é o rendimento médio original de um dado ano; x_i , a sequência de anos na série analisada; a e b , coeficientes linear e angular da reta de regressão linear, respectivamente, e Y_{ci} , o rendimento médio com a tendência removida.

O rendimento de grãos relativo foi calculado, por normalização dos rendimentos obtidos, pelo rendimento máximo verificado na série de anos analisados em cada um dos distritos.

O rendimento de grãos médio, após a remoção da tendência removida, e o rendimento de grãos relativo constituíram as variáveis dependentes usadas para o ajuste dos modelos.

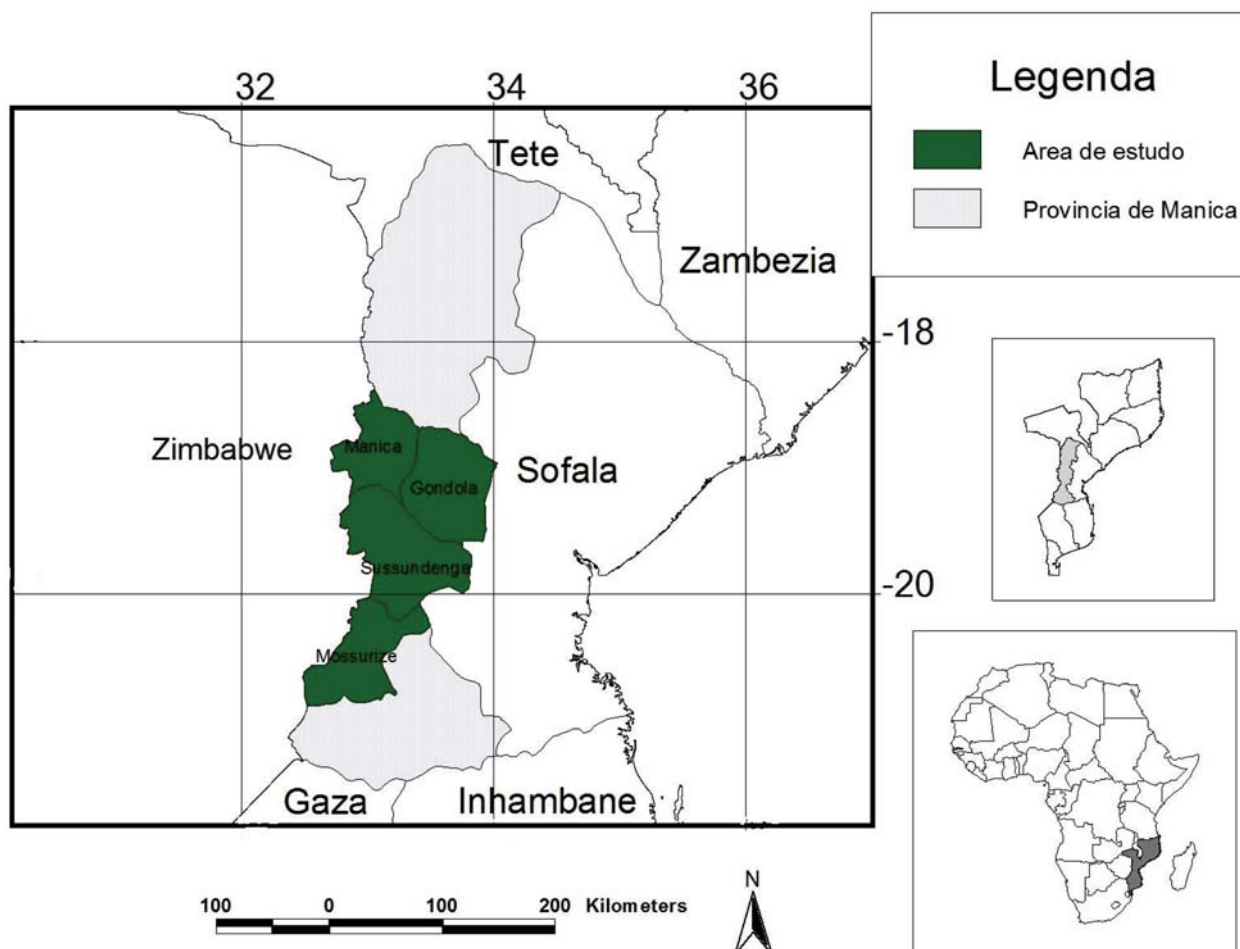


Figura 1. Localização da área de estudo

Modelo de estimativa do início do ciclo

Na indisponibilidade de informações sobre o calendário agrícola nos anos analisados, foi definido um critério para determinar a data de semeadura, de modo a efetuar as simulações do modelo do balanço hídrico das culturas, com base no conhecimento da prática agrícola na região. Foi considerado o decêndio de semeadura, aquele que apresentou registro de precipitação pluvial superior a 25 mm, seguido de dois decêndios com precipitação pluvial total superior a 20 mm, pois sabe-se que, após um período de chuvas, inicia-se o plantio na totalidade das áreas cultivadas pelos agricultores da região. Este critério é comum para a definição do início do ciclo e foi aplicado, por alguns autores, em casos semelhantes, no continente africano, e, especificamente, em Moçambique (Cumba, 2001; Cambaza, 2007; Rojas, 2007; Mabilana, 2008). O modelo de estimativa de início do ciclo foi implementado com base nas estimativas decendiais de precipitação pluvial. Foi, também, definido um ciclo fixo, com duração de 130 dias, que compreenderam 13 decêndios, dos dados meteorológicos, e 9 composições de 16 dias, dos índices de vegetação. Assumiu-se que o ciclo é composto de 20 dias, no estágio inicial, 40 dias, no desenvolvimento vegetativo, 40 dias, na cobertura máxima e 30 dias na maturação.

Modelo do Balanço hídrico

Os valores de precipitação pluvial (P) e evapotranspiração de referência (ET_0 – Penman Montheith) decendial foram usados na implementação do modelo do balanço hídrico meteorológico (Thornthwaite & Mather, 1955), a partir do qual foram calculados a evapotranspiração relativa (ET_r/ET_m) e o Índice de Satisfação das Necessidades de Água ($ISNA$), por decêndio, ao longo do ciclo do milho, em cada um dos distritos e ano agrícola.

O $ISNA$ é um indicador do desempenho de uma dada cultura, baseado na disponibilidade de água, sendo que, quanto maior for o valor do índice, menor o déficit hídrico da cultura (FEWS NET, 2007). É calculado por:

$$ISNA_i = \frac{\sum_{j=1}^{13} ET_{rj}}{\sum_{i=1}^{13} ET_{mi}} \cdot 100 \quad (6)$$

em que i é o índice do decêndio após o início do ciclo, ET_r é a Evapotranspiração real, ET_m é a evapotranspiração máxima da cultura, determinada a partir do produto entre evapotranspiração de referência (ET_0) e o coeficiente de cultura (K_c), correspondendo ao total da necessidades de água da cultura (equação 7).

$$ET_{mi} = ET_{0i} \cdot K_c \quad (7)$$

O coeficiente de cultura (K_c) é um parâmetro obtido experimentalmente, varia com a cultura e seu estágio de desenvolvimento e representa a relação entre evapotranspiração de referência (ET_0) e a evapotranspiração de cultura (ET_c), em condições hídricas ótimas. Os valores de K_c da maioria das culturas, para cada estágio fenológico, encontram-se tabelados em Doorenbos & Pruitt (1976).

A ET_r corresponde à quantidade de água que a planta consome, em condições reais de disponibilidade de água. Em situações em que há plena satisfação das necessidades hídricas da cultura ao longo do seu ciclo, a ET_r é igual ao ET_m . Do contrário, a ET_r é inferior a ET_m e pode ser estimada a partir do déficit hídrico, resultado da não satisfação das necessidades de água da cultura (ET_m) (equação 8).

$$ET_{ri} = P_i - (ARM_i - ARM_{i-1}) \quad (8)$$

em que P_i é a precipitação pluvial no decêndio i e $(ARM_i - ARM_{i-1})$ corresponde à variação na quantidade de água armazenada no solo, entre o decêndio atual e o imediatamente anterior.

Máscara de cultivo

O objetivo da máscara de cultivo foi remover os efeitos de alvos não agrícolas na área de estudo sobre os valores médios dos índices de vegetação extraídos da área de estudo.

Para a construção da máscara de cultivo foi analisado, para cada *pixel*, o perfil temporal do NDVI, ao longo do ciclo do milho, e estabelecido um limiar (valor de diferença entre o máximo NDVI, correspondente ao período de máximo vigor vegetativo, e o mínimo NDVI, correspondente ao período de implantação da cultura), característica da cultura.

Foram então geradas imagens binárias, em que os *pixels* com valor zero (0) correspondem aos *pixels* que apresentaram variação de NDVI inferiores ao limiar (classe não milho) e os *pixels* com valor um (1), aos que apresentaram variação superior ao limiar (classe milho). Este limiar foi definido, para cada ano agrícola e para cada distrito da área de estudo, por comparação com o dado oficial.

Após, foi feito o somatório das imagens binárias nos nove anos agrícolas em estudo. Na imagem resultante, os *pixels* mostraram valores no intervalo de zero (0) a nove (9). Os *pixels* com valor zero (0) corresponderam às áreas que não apresentam variação de NDVI superior ao limiar, em ano agrícola algum. Os *pixels* com valores entre um (1) e nove (9) corresponderam aos locais em que se verificaram variações de NDVI superiores ao limiar, entre um e nove anos, respectivamente.

Na imagem de máscara de cultivo, os *pixels* com valor nove (9) corresponderam aos locais que apresentam vari-

ação de NDVI superior ao limiar em todos os anos de estudo, sendo, por isso, prováveis áreas agrícolas consolidadas. Eles correspondem ao maior nível de restrição, reduzindo-se, sucessivamente, com a redução do valor do *pixel*.

Foram calculadas as áreas correspondentes aos diferentes níveis de restrição e comparadas com as áreas cultivadas com milho, divulgadas pelas estatísticas agrícolas oficiais. O nível de restrição que apresentou áreas mais próximas às estatísticas agrícolas correspondeu à máscara final de cultivo por distrito.

Ajuste do Modelo Agrometeorológico-espectral

Os valores médios de índices espectrais foram extraídos da máscara de áreas agrícolas, nos períodos de desenvolvimento do milho, e incluídos como variáveis espectrais de entrada no ajuste do modelo. Os dados provenientes do cálculo do ISNA e (ETr/ETm) foram igualmente incluídos no ajuste do modelo como o conjunto de variáveis agrometeorológicas. Os dados foram organizados por ano agrícola, em cada um dos distritos da área de estudo, e foram analisados no pacote de análises estatísticas SPSS 13.

As variáveis foram inseridas em um modelo de regressão linear múltipla e relacionadas com os rendimentos médios do milho, cuja expressão deveria conter (equação 9): um termo proveniente do conjunto de variáveis agrometeorológicas (T_{agr}) e outro termo espectral proveniente dos índices espectrais (T_{esp}).

$$Y = aT_{agr} + bT_{esp} + c \quad (9)$$

A identificação das combinações de variáveis que melhor explicassem as variações de rendimentos (Y) foi feita, usando-se o método de seleção de variáveis *stepwise forward*. Este método seleciona o conjunto de expressões de modelos com “boa” relação com a variável dependente da regressão, adicionando as variáveis que providenciam maior impacto sobre a soma dos quadrados do resíduo (Rawlings *et al.*, 1998).

A avaliação das expressões dos modelos foi feita por meio dos seus coeficientes de correlação (r) e de determinação ajustados (r^2), a 95% de probabilidade. Foi também verificada a significância das constantes a , b e c , pelo teste t , sobre as expressões dos modelos. Outra avaliação efetuada foi pela determinação da raiz do erro médio quadrático (RMSE- *Root Mean Square Error*), entre as estimativas de rendimento do modelo e os rendimentos observados. O RMSE é uma medida de erro total de um dado modelo, definida pela raiz quadrada da soma das variâncias (equação 10). Esta medida assume que o maior erro na estimativa do rendimento tenha maior peso proporcional que os erros menores (Rojas, 2007).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Y - \hat{Y})^2}{N}} \quad (10)$$

na qual Y é o rendimento médio observado, \hat{Y} o rendimento médio estimado pela expressão matemática do modelo e o N o número da amostra usada no ajuste. Os desempenhos dos modelos são tanto menores quanto maiores forem os seus respectivos RMSE's calculados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Remoção da tendência dos dados de rendimento

A Figura 2 apresenta a evolução temporal dos rendimentos médios em cada um dos distritos, na série de anos agrícolas em estudo. Existem tendências temporais nos rendimentos médios de milho, em todos os distritos que compõem a área de estudo. Os distritos de Gondola, Manica, e Sussundenga apresentaram tendências temporais crescentes, contrariamente ao distrito de Mossurize, que apresentou rendimentos médios decrescentes ao longo dos anos. A remoção da tendência temporal sobre os registros médios de rendimento das culturas constitui um passo importante em modelagem agrometeorológica por regressão linear múltipla. Uma das pré-suposições desta técnica é de que a variabilidade das condições meteorológicas explica grande parte das variações anuais dos rendimentos das culturas. Assim, melhorias tecnológicas, que resultem em aumento dos rendimentos médios, podem influenciar negativamente os resultados da modelagem. Gommers (2001) afirmou que a tendência temporal dos rendimentos deverá ser removida, por não depender das condições do tempo.

Modelo de estimativa do início do ciclo

Os períodos de semeadura, definidos pelo modelo de início de ciclo, ocorreram entre os meses de outubro e dezembro (Tabela 1). Este intervalo de meses coincide com os resultados obtidos por Cumba (2001), que determinou data média de semeadura do milho, usando séries de precipitação pluvial decenal de 28 a 29 anos, na província de Manica. O critério para definição da data de semeadura, usado pelo mesmo autor, foi o decêndio que apresentasse precipitação pluvial superior a 20 mm. Este critério de definição tem validade na medida em que simula estratégias de semeadura comuns, aos agricultores do setor familiar, para culturas não irrigadas, que se resumem, essencialmente, em efetuar a semeadura após o início da época chuvosa (Mabilana, 2008). O período de defasagem máxima, em termos de datas de semeadura, no mesmo ano agrícola, é de dois decêndios, entre os distritos, o que resulta em ciclos de culturas mais ou menos homogêneos em todos os distritos analisados.

Modelo do balanço hídrico das culturas

Os valores do ISNA decendial, calculados para os anos agrícolas avaliados, apresentaram grande variabilidade em todos os distritos. Verifica-se uma tendência decrescente no ISNA calculado, ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, o que é esperado, uma vez que o ISNA estima o déficit hídrico acumulado ao longo do ciclo (Figura 3). Portanto, o valor de ISNA de um determinado decêndio do ciclo do milho reflete, de certa forma, a disponibilidade de umidade do solo para o milho em todo o período anterior ao decêndio.

Por outro lado, ao longo do ciclo, há um aumento das necessidades de água da cultura. Como resultado do desenvolvimento fenológico, simulado pelo aumento do kc,

aumenta a chance de ocorrência de déficit hídrico. A variabilidade interanual do ISNA evidencia as diferenças na disponibilidade de umidade para o desenvolvimento das culturas, explicando, em parte, a variação anual do rendimento médio do milho.

Análise de correlação

A Figura 4 apresenta os coeficientes de correlação, determinados entre as variáveis agrometeorológicas e espectrais, e o rendimento médio de grãos do milho. Todas as observações relativas à evolução do coeficiente de correlação das variáveis estudadas com o rendimento médio são também válidas para o rendimento relativo.

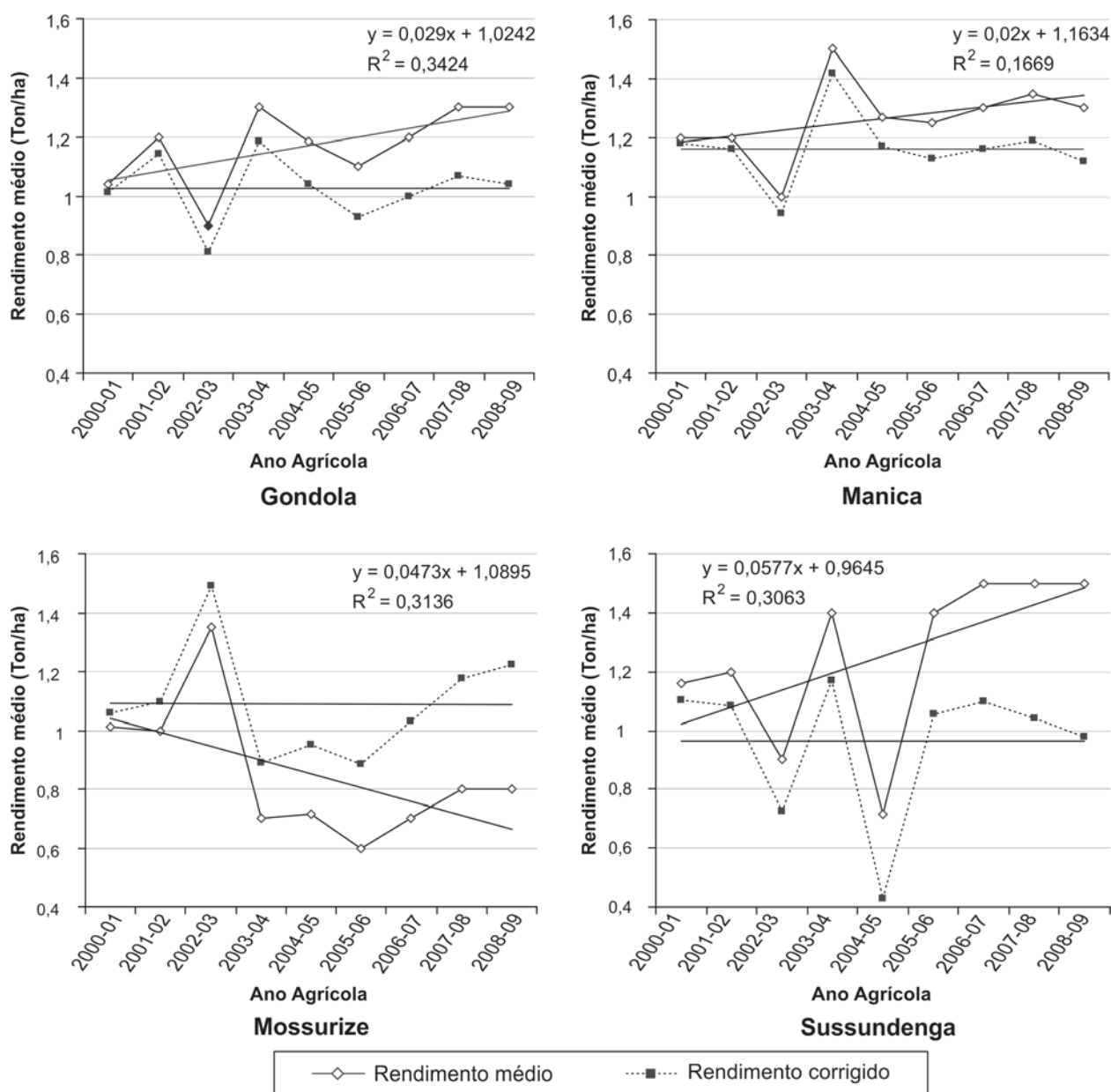


Figura 2. Evolução do rendimento médio do milho e o rendimento corrigido, nos distritos de Gondola, Manica, Mossurize e Sussundenga, suas respectivas equações de regressão linear do rendimento médio ao longo dos anos.

O ISNA decendial e os rendimentos médios do milho têm uma relação direta (coeficiente positivo), nos distritos de Gondola, Manica e Sussundenga. Dados do distrito de Mossurize indicam uma relação inversa entre o ISNA decendial e os rendimentos médios do milho. A situação deste distrito é contrária à esperada, já que o ISNA é um estimador do estresse hídrico da cultura, devendo, pelo menos, apresentar uma relação direta com o rendimento de grãos, tal como sucede nos restantes distritos analisados. É possível observar um padrão semelhante na evolução do coeficiente de correlação dos distritos de Gondola e Manica com máximos de correlação no segundo e nono decêndio.

Os coeficientes de correlação entre a Evapotranspiração relativa (ETr/ETm) e o rendimento médio de grãos do milho ao longo do ciclo não apresentaram padrão semelhante em todos os distritos analisados. Isto decorre do fato de a ETr/ETm tratar-se de uma medida de déficit hídrico decendial e, ao contrário do ISNA, não depender de situações de maior ou menor déficit de decêndios anteriores, contribuindo para a suavização das curvas de coeficiente de correlação com o ISNA. O mesmo comportamento atípico dos coeficientes de correlação em relação ao rendimento de grãos, ocorrido no distrito de Mossurize, verifica-se para ETr/ETm, com correlações negativas na maioria dos decêndios. Maiores coeficientes de correlação nos demais distritos ocorrem no nono e décimo decêndio após o início do ciclo.

Os índices espectrais ao longo do ciclo têm correlações positivas, com o rendimento do milho, nos distritos de Gondola, Manica e Sussundenga, sendo que as maiores se encontram nas quinzenas 6, 7 e 8; que correspondem aos decêndios de 9 a 11 após ao início do ciclo. Esse período do ciclo coincide com a floração e formação do grão, quando a ocorrência de estresse hídrico é determinante para o rendimento final do milho (Doorenbos & Kassam, 1979; Bergamaschi & Matzenauer, 2009).

Os índices espectrais em estudo são indicadores da condição atual da vegetação, pela relação com a atividade

de fotossintética, biomassa e conteúdo de água. Em áreas agrícolas, os valores de índices espectrais são, de certo modo, reflexo da disponibilidade de água para as culturas em períodos imediatamente anteriores. Mabilana *et al.* (2010) verificaram, para o distrito de Sussundenga, que o NDVI e o EVI estão fortemente associados aos registros de precipitação pluvial e evapotranspiração potencial do mês anterior. Portanto, uma boa correlação, verificada entre os índices espectrais e o rendimento do milho, em um dado período, deverá estar associada à condição hídrica da cultura, no período que o antecede. Sendo significativas as correlações verificadas nos decêndios 9, 10 e 11, podendo portanto, ser o reflexo da disponibilidade hídrica dos decêndios 8, 9 e 10, que também apresentaram relação entre as variáveis agrometeorológicas.

Para o distrito de Mossurize, verificaram-se correlações negativas entre o rendimento médio de grãos do milho e os índices espectrais ao longo do ciclo, do mesmo modo que com as variáveis agrometeorológicas, comportamento diferente do esperado, contradizendo a ligação entre os índices espectrais com a condição geral da vegetação, com efeito direto sobre o rendimento das culturas. No caso do distrito de Mossurize, considerações relativas à qualidade dos dados de rendimento de grãos do milho fornecidos deverão ser levadas em conta. O distrito foi, portanto, excluído de todas as análises subsequentes.

Ajuste dos modelos

A Tabela 2 apresenta as expressões matemáticas dos modelos de estimativa de rendimentos de grãos do milho, como resultado da aplicação do método de seleção de variáveis *stepwise forward*, em modelos de regressão múltipla para cada um dos distritos estudados e a nível regional.

As expressões dos modelos de estimativas apresentaram, em geral, bom desempenho, evidenciado pelo coeficiente de correlação e o RMSE calculado em cada um dos distritos. Na maioria dos casos, a escolha de variáveis coincide com os períodos críticos, na definição do

Tabela 1. Datas de semeadura do milho, definidas pelo modelo de estimativa de início do ciclo por ano e por distrito, considerando-se o ciclo com duração de 130 dias

	Gondola		Manica		Mossurize		Sussundenga	
	início	final	início	final	início	final	início	final
2000/01	21/out	28/fev	21/out	28/fev	11/out	18/fev	21/out	28/fev
2001/02	11/Nov	21/mar	11/nov	21/mar	11/Nov	21/mar	11/nov	21/mar
2002/03	01/out	08/fev	01/out	08/fev	21/out	28/fev	21/set	29/jan
2003/04	11/dez	20/abr	11/dez	20/abr	21/dez	30/abr	11/out	18/fev
2004/05	01/out	08/fev	21/nov	31/mar	01/out	08/fev	01/out	08/fev
2005/06	01/dez	10/abr	01/dez	10/abr	01/dez	10/abr	01/dez	10/abr
2006/07	01/Nov	11/mar	11/nov	21/mar	11/Nov	21/mar	01/dez	10/abr
2007/08	01/Nov	11/mar	01/nov	11/mar	01/Nov	11/mar	01/nov	11/mar
2008/09	01/Nov	11/mar	01/nov	11/mar	01/Nov	11/mar	11/dez	20/abr

rendimento de grãos do milho. Bergamaschi & Matzenauer (2009) referem que a ocorrência de um déficit hídrico, duas semanas antes ou após o espigamento, causa uma grande redução no rendimento dos grãos de milho. Considerando-se um ciclo do milho de 130 dias, estima-se que este período ocorra entre o decêndio 9 e 11 após a semeadura.

Apesar do bom desempenho dos modelos de estimativa de rendimento médio de grãos do milho, gerados nos distritos, e do comprovado significado físico da maioria das variáveis selecionadas no ajuste distrital, o número de amostras por distrito faz com que estes sejam pouco robustos. O número reduzido da amostra é decorrente do tempo de atividade do sensor MODIS, que se encontra em atividade desde 2000, correspondendo a 9 anos agrí-

colas até o ano de 2009. Portanto, são usadas nove amostras de dados médios de índices espectrais, no ajuste do rendimento médio de grãos do milho, em cada distrito, explicando-se a grande variação nas variáveis das expressões dos modelos interdistritos.

A integração dos grupos de variáveis dos três distritos (Gondola, Manica e Sussundenga) com ajustes de modelos válidos na área de estudo, permitiu um aumento considerável no tamanho da amostra, melhorando a sua robustez. Essa integração é possível pelo fato de a área de estudo, ser uma área homogênea, em termos climáticos e pedológicos, pela predominância de uma mesma região agroecológica, o que permite que as culturas adaptem-se de maneira semelhante. Por essa razão, os modelos regio-

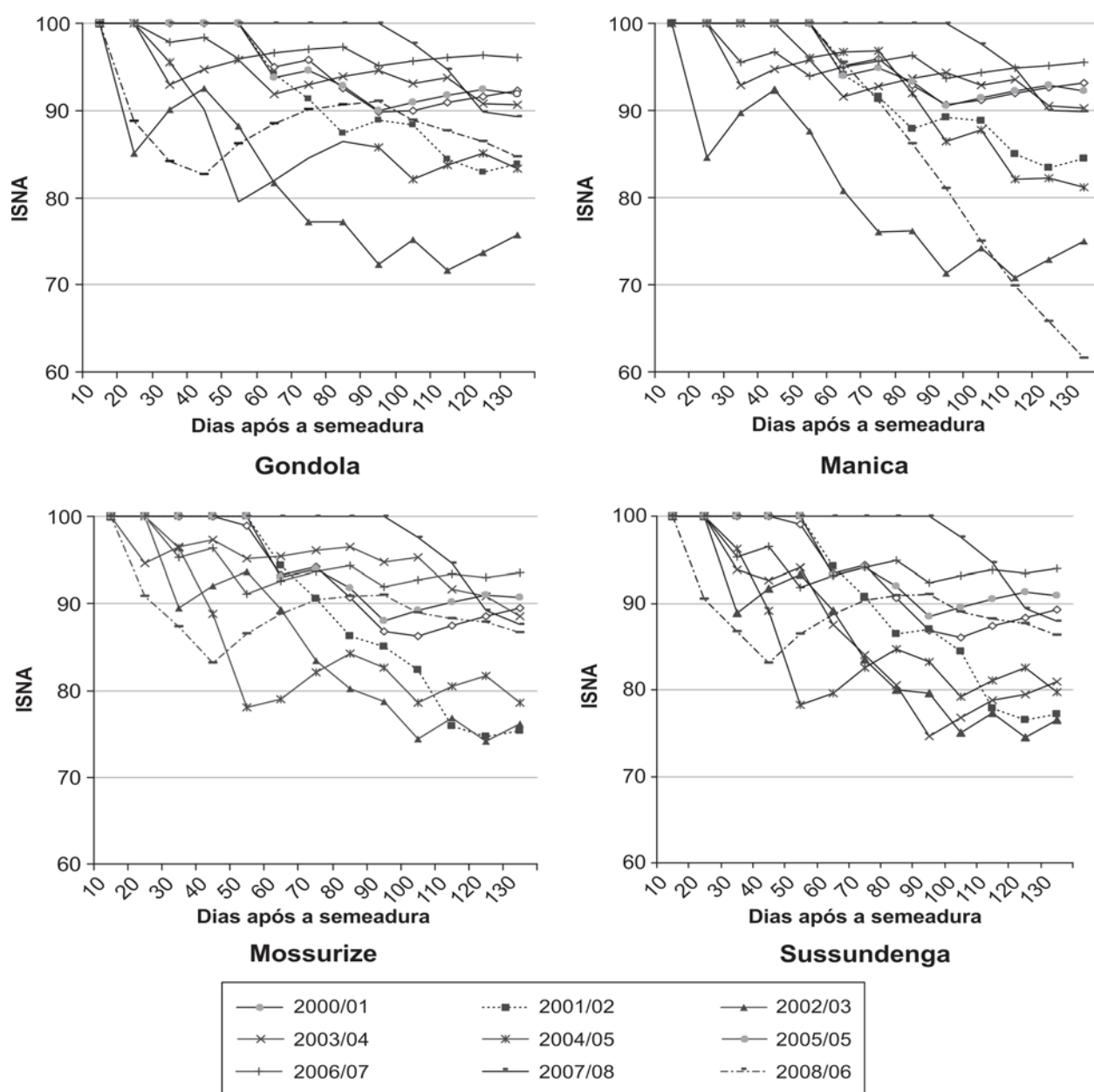


Figura 3. ISNA decennial calculados nos distritos de Gondola, Manica, Mossurize e Sussundenga em cada ano agrícola.

nais mostraram-se mais adequados e recomendados para fins de modelagens de rendimentos das culturas na área, apesar do desempenho inferior em termos do coeficiente de correlação e RMSE.

Em geral, todos os modelos ajustados com o rendimento relativo tiveram um desempenho superior aos dos ajustados pelo rendimento médio, o que reforça o uso da

expressão do modelo regional de rendimentos relativos para estimativa de rendimentos média de grãos do milho sobre a área de estudo. A expressão do modelo regional de estimativas de rendimentos inclui ambos os conjuntos de dados (agrometeorológico e espectral), com um desvio médio de 9,43 % em relação ao rendimento máximo do distrito.

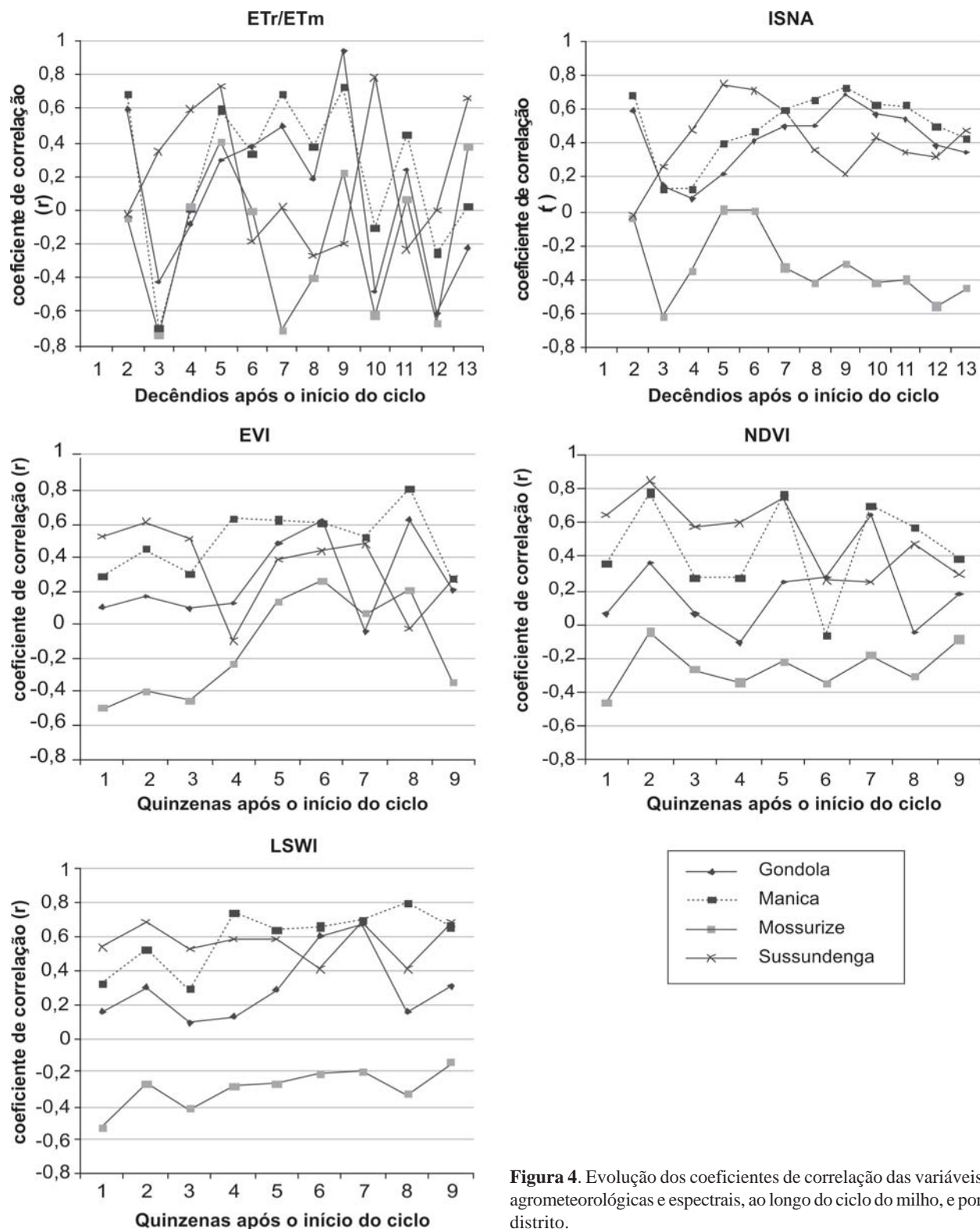


Figura 4. Evolução dos coeficientes de correlação das variáveis agrometeorológicas e espectrais, ao longo do ciclo do milho, e por distrito.

Considerações sobre os Modelos

As expressões dos modelos apresentadas, para estimativa do rendimento médio de grãos do milho sobre a área de estudo, usaram produtos de sensoriamento remoto, como índices espectrais, e estimativas de elementos meteorológicas. Vale a pena fazer referências a algumas limitações do estudo, decorrentes do uso desse gênero de dados.

O uso de estimativas de elementos meteorológicos como fonte de variáveis agrometeorológicas, no ajuste do modelo, constitui um limitante. As estimativas de elementos meteorológicos da ECMWF são resultados de modelos de previsão meteorológicas, recolhidos e aplicados em monitoramento e previsão de safras, na Europa, pela MARS Unit (*Monitoring Agriculture ResourceS*), da JRC (*Joint Research Centre*). A principal preocupação do uso de estimativas de elementos meteorológicos em modelos operacionais de previsão de rendimentos é relativa a sua acurácia espacial e temporal (Rojas, 2003). Melo & Fontana (2006) e Rojas (2003) avaliaram as estimativas de elementos do ECMWF, no Rio Grande do Sul-Brasil e no Quênia, respectivamente, confirmando a sua aplicabilidade. Mabilana *et al.* (2010) compararam registros mensais de precipitação pluvial de Sussundenga, com estimativas do modelo da ECMWF, verificando uma boa associação entre eles, apesar da superestimativa em meses com precipitação pluvial entre 0 e 50 mm e subestimativa em meses com valores superiores a 200 mm. Mesmo que as estimativas de elementos meteorológicos evidenciem a possibilidade de substituição dos registros de campo, o uso dos dados de campo, para esse gênero de aplicações, continua sendo ideal, para fins de monitoramento e previsão de safras.

Na indisponibilidade de informação sobre o calendário agrícola nos anos de análise, foi definido um critério para determinar período de semeadura e definição do ciclo médio da cultura. Apesar de o critério aplicado basear-se em estratégias de semeadura características do setor familiar, em Moçambique, e de constituir uma boa alternativa, as informações de calendário agrícola não se comparam com as informações de campo.

A consideração mais importante diz respeito à resolução espacial dos dados espectrais. O sensor MODIS possui uma resolução espacial máxima de 250 metros, que corresponde a uma área de 6,25 hectares, superior à área média de explorações agrícolas em Moçambique, que de acordo com INE (2011) está na ordem de 1,5 hectares. Se considerarmos um cenário em que as explorações agrícolas encontram-se fragmentadas no espaço, a resolução espacial do sensor MODIS pode não ser a mais adequada para extração de feições espectrais dos cultivos em campo. Porém, neste sistema de produção, o tamanho das explorações agrícolas no setor familiar é condicionado pela força de trabalho e definido pelo tamanho do agregado familiar. Nesta linha de pensamento, espera-se que as grandes áreas de exploração agrícolas localizem-se nas grandes concentrações populacionais rurais e que haja menor dispersão das explorações. A resolução temporal do sensor MODIS constitui um atributo que, de certo modo, supera o constrangimento da menor resolução espacial quando ele é usado para aplicações agrícolas. Tratando-se de cultivos anuais com ciclo de até quatro meses, é necessário que se obtenham imagens com relativa frequência, de modo que se faça o monitoramento do vigor das plantas em todos os estádios fenológicos do milho. O sistema de cultivo em consórcio, característico em Moçambique, inviabiliza a pos-

Tabela 2. Avaliação das expressões dos modelos

	Modelo	r ²	RMSE
Gondola	$Y(\text{ton / ha}) = 1,132 + 0,532 \cdot \left(\frac{ETr}{ETm} \right)_9 - 0,871 \cdot LSWI_8$	0,948	0,0247
	$\frac{Y_o}{Y_m} = 0,969 + 0,446 \cdot \left(\frac{ETr}{ETm} \right)_9 - 0,754 \cdot LSWI_8$	0,918	0,0209
Manica	$Y(\text{ton / ha}) = 2,123 \cdot LSWI_8$	0,605	0,0677
	$\frac{Y_o}{Y_m} = 2,419 \cdot EVI_8 - 1,156 \cdot NDVI_6$	0,852	0,0325
Sussundenga	$Y(\text{ton / ha}) = 0,658 + 0,485 \cdot \left(\frac{ETr}{ETm} \right)_{10}$	0,605	0,1627
	$\frac{Y_o}{Y_m} = -2,087 + 4,489 \cdot NDVI_8 - 1,441 \cdot EVI_2$	0,956	0,2308
Regional	$Y(\text{ton / ha}) = 0,010 \cdot ISNA_7$	0,225	0,1539
	$\frac{Y_o}{Y_m} = 1,246 \cdot LSWI_7 + 1,396 \cdot EVI_9 - 0,869 \cdot EVI_7 + 0,127 \cdot \left(\frac{ETr}{ETm} \right)_{13}$	0,762	0,0943

sibilidade de um mapeamento específico do milho na região, mas dada a importância e a significativa porção de terra alocada para o milho, no setor familiar, a modelagem de rendimentos do milho foi implementada sobre o mapa de áreas agrícolas. O mapeamento realizado, apesar de não possuir validação em campo, é baseado em pressupostos teóricos sólidos. Rojas (2007) ajustou com sucesso o modelo de estimativa de rendimentos com dados de NDVI/SPOT VGT, com resolução de 1 km, em campos fragmentados de milho, no Quênia.

A grande vantagem do uso desta metodologia para fins de segurança alimentar reside na facilidade de obtenção de dados para ajuste, que se encontram disponíveis para *download* na *internet*, sem qualquer custo monetário e a um processamento elevado (caso concreto das imagens MODIS: correção atmosférica e georeferenciamento), reduzindo o tempo de calibração e, ou, normalização necessárias em análises multitemporais. A aplicação de modelos de regressão linear para o ajuste dos parâmetros constitui outro ponto positivo, por permitir uma flexibilidade temporal e espacial na estimativa dos parâmetros e por serem de fácil implementação em pacotes estatísticos.

CONCLUSÕES

As variáveis agrometeorológicas e espectrais apresentam relação direta com os rendimentos médios e relativos de grãos do milho, tanto distrital (Gondola, Manica e Sussundenga), como regional. As expressões de modelos gerados por distrito evidenciam a potencialidade, tanto do termo agrometeorológico, quanto do termo espectral, na explicação das variações dos rendimentos médios de grãos do milho na província de Manica.

No caso específico da área de estudo, as variáveis espectrais superam as agrometeorológicas na explicação das variações anuais do rendimento médio de grãos do milho.

Expressões matemáticas, geradas a partir do ajuste de modelos de estimativas de rendimentos de grãos das culturas, permitem a quantificação da produção esperada, em tempo quase real, podendo ser importante fonte de informação para tomada de decisão sobre medidas de segurança alimentar e abastecimento, aumentando, deste modo, o tempo de resposta em situações de déficit alimentar.

As limitações à aplicação dos dados para ajuste do modelo agrometeorológico espectral sobre a área de estudo deverão ser consideradas na sua implementação; porém, não inviabilizam o seu uso e provável operacionalização das expressões de modelos gerados, logo que efetuadas as validações necessárias.

REFERÊNCIAS

- Bergamaschi H & Matzenauer R (2009) Agrometeorologia do Milho In: Monteiro JE (Ed.) Agrometeorologia dos Cultivos: Fator meteorológico na produção agrícola, Brasília, INMET. 530p.
- INE (2011) Censo AgroPecuário 2009-2010 - Resultados Definitivos, Moçambique, Instituto Nacional de Estatística. 38p.
- Cambaza C (2007) Estudo das datas de sementeira para reduzir o risco de falha da Cultura do milho (*Zea Mays* L.) na agricultura de sequeiro no distrito de Chókwè. Projecto Final. Universidade Eduardo Mondlane, Maputo. 44p.
- Cumba R (2001) Estratégias de Sementeira do Milho na Agricultura de Sequeiro em Moçambique. Trabalho de Licenciatura. Universidade Eduardo Mondlane, Maputo. 41p.
- DNSA/MINAG (2000) Metodologia para estimativas da produção, superfície cultivada e rendimentos da campanha agrícola. Maputo, Ministério da Agricultura de Moçambique. 7p.
- Doorenbos J & Pruitt WO (1976) Las Necesidades de agua de los cultivos. Roma, FAO. 193p.
- Doorenbos J & Kassam AH (1979) Yield Response to Water. Rome, FAO. 193p.
- Famine Early Warning System Network (2007) Water Requirement Satisfaction Index (WRSI). Disponível em: <<http://igskmnwnb015.cr.usgs.gov/adds/readme.php?symbol=ws>>. Acessado em: 2 de novembro de 2009.
- Fontana DC & Berlato MA (1998) Modelo agrometeorológico-espectral para a estimativa do rendimento de soja no Rio Grande do Sul: um estudo preliminar. In: IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos. Anais, INPE. CD ROM.
- Gommes R (2001) An introduction to the art of agrometeorological crop yield forecasting using multiple regression. Dhaka, FAO. 38p.
- Huete A, Justice C & Leeuwen W (1999) MODIS vegetation index (MOD13) Algorithm Theoretical Basis Document. Version 3. 129p.
- Jensen JR (2009) Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos, Editora Parêntese. 598p.
- Klering E (2007) Avaliação do uso de imagens MODIS na modelagem agrometeorológica-espectral de rendimento de arroz irrigado no Rio Grande Do Sul. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 116p.
- King D (1989) Remote sensing and agrometeorological models for yield forecasts. Ispra, Joint Research Centre. 25p.
- Mabilana HA, Fontana DC & da Fonseca EL (2010) Análise do uso de estimativas de precipitação pluvial do modelo ECMWF no distrito de Sussundenga-Moçambique In: XVIII Jornadas de Jovens Investigadores da AUGM 2010, Santa Fé. Anais, Ediciones UNL. p.134.
- Mabilana HA (2008) Determinação da data de sementeira do milho a partir de Análise de dias secos no distrito de Chókwè. Projecto final. Universidade Eduardo Mondlane, Maputo. 58p.
- Melo RW & Fontana DC (2006) Avaliação de dados meteorológicos disponíveis no website do Joint Research centre. In: 2^o International Workshop of Crop Monitoring and Forecast, Montevideo. Anais, JRC. p.113-126.
- Melo RW, Fontana DC, Berlato MA & Ducati JR (2008) An Agrometeorological-spectral model to estimate soybean yields, applied to southern Brazil. International Journal of Remote Sensing, 14:4013-4028.

- MICOA (2002) Relatório sobre o estado do ambiente. Maputo, Ministério Para Coordenação da Acção Ambiental. 106p.
- Rawlings JO, Pantula SG & Dickey DA (1998) Applied regression analysis: A Research tool. 2nd edition. New york, Springer-Velag. 650p.
- Rizzi R & Rudorff B (2005) Estimativa de produtividade de soja por meio de um modelo agrometeorológico espectral: Estudo de caso no Rio grande do Sul In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia. Anais, INPE. p.237-244.
- Rojas O (2003) Comparing EMCWF Average Rainfall Estimates With CPSZ Average Interpolated Rainfall For The IGAD Region. In: Rijks D, Rembold F, Nègre T, Gommès R & Cherlet M (Eds.) In: International Workshop: Crop and rangeland Monitoring in Eastern Africa - For early Warning and Food Security, Nairobi. Proceedings, JRC/FAO. p.83-88.
- Rojas O (2007) Operational Maize Yield Model development and Validation based on remote Sensing and Agrometeorological data in Kenya. International Journal of Remote Sensing, 17: 3775-3793.
- Rojas O & Amade J (1998) Spatial calculation of the maize yields in Mozambique using water stress model of FAO. Maputo, IIAM. 15p.
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA & Deering DW (1974) Monitoring Vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Third Earth Resources Techonology Satellite-1 Symposium, Greenbelt. Proceedings, NASA SP-35. p.3010-3017.
- Ruddorff B & Batista G (1990) Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. Remote sensing of Enviroment, 33:183-192.
- Thorntwaite CW & Mather JR (1955) The Water Balance. Centerton, Drexel Institute of Technology/Laboratory of Climatology. 104p.
- Walker T, Pitoro R, Tomo A, Siteo I, Salência C, Mahanzule R, Donovan C & Mazuze F (2006) Estabelecimento de Prioridades para a Investigação Agrária no Sector Público em Moçambique Baseado nos Dados do Trabalho de Inquérito Agrícola (TIA). Maputo, Instituto de Investigação Agrária de Moçambique. 72p. (Relatório de Pesquisa N°3P)